VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

4 Pierderi de tensiune

4.1 Introducere

Pentru a determina efortul în armăturile pretensionate trebuie ținut seama de anumite fenomene, cum ar fi frecarea la întiderea armăturilor, lunecarea în ancoraj la blocare, nesimultaneitatea tensionării diefritelor armături, deformațiile datorate tratamentului termic, relaxarea eforturilor în armătură, curgerea lentă a betonului. Toate aceste fenomene produc pierderi de efort (tensiune) în armăturile pretensionate.

Primele patru fenomene sunt instantanee (şi au cauze legate de tehnologia de execuție). Ultimele două sunt fenomene care se desfăşoară pe o perioadă lungă de timp, durând mai mulți ani (fenomene reologice).

Pierderile de tensiune se calculează diferit pentru procedeul cu armături preîntinse față de procedeul cu armături postîntinse.

În normele româneşti STAS 10107/0-90 sunt considerate următoare pierderi de tensiune :

a) Armături preîntinse

- Faza inițială :

$\Delta\sigma_\lambda$ = pierdere datorită lunecării (reculului) în ancoraj la blocare ;
$\Delta\sigma_f$ = pierdere datorită frecării pe traseu a armăturilor ;
$\Delta\sigma_s$ = pierdere datorită tensionării succesive a armăturilor ;
$\Delta\sigma_t$ = pierdere datorită tratementului termic ;
$\Delta\sigma_{ri}$ = pierdere datorită relaxării armăturilor înainte de transfer.

- Faza finală :

$\Delta\sigma_{rf}$ = pierdere datorită relaxării armăturilor după transfer ;
$\Delta\sigma_\phi$ = pierdere datorită curgerii lente a betonului.

b) Armături postîntinse

- Faza inițială :

$\Delta\sigma_\lambda$ = pierdere datorită lunecării (reculului) în ancoraj la blocare ;
$\Delta\sigma_f$ = pierdere datorită frecării pe traseu a armăturilor ;
$\Delta\sigma_s$ = pierdere datorită tensionării succesive a armăturilor ;
$\Delta\sigma_{str}$ = pierdere datorită strivirii betonului sub armăturile înfăşurate ;

- Faza finală :

$\Delta\sigma_r$ = pierdere datorită relaxării armăturilor ;
$\Delta\sigma_\phi$ = pierdere datorită curgerii lente a betonului.

4.2 Variabilitatea pierderilor de tensiune. Calcul eforturilor în armături

Pierderile de tensiune calculate conform STAS 10107/0-90 sunt valori maxime probabile, şi sunt cu circa 20% mai mari decât valorile medii. Valorile minime probabile sun cu 20% mai mici decât valorile medii. Rezultă următoarea relaţie între valorile minime şi cele maxime ale pierderilor de tensiune :

$$\Delta\sigma^{min} = 0{,}80\Delta\sigma^{moyen} = (0{,}80/1{,}20)\ \Delta\sigma^{max} \cong 0{,}65\Delta\sigma^{max} \qquad (4.1)$$

În consecinţă, se pot calcul valori minime şi respectiv valori maxime ale eforturilor din armătură :

- pentru armăturile preîntinse :
  - în faza iniţială
    $$\sigma_{p0}^{min} = \sigma_{pk} - (\Delta\sigma_\lambda + \Delta\sigma_f + \Delta\sigma_s + \Delta\sigma_t + \Delta\sigma_{ri}) \qquad (4.2)$$
    $$\sigma_{p0}^{max} = \sigma_{pk} - 0{,}65(\Delta\sigma_\lambda + \Delta\sigma_f + \Delta\sigma_s + \Delta\sigma_t + \Delta\sigma_{ri}) \qquad (4.3)$$
  - în faza finală
    $$\bar{\sigma}_{p0}^{min} = \sigma_{p0}^{min} - (\Delta\sigma_\phi + \Delta\sigma_{rf}) \qquad (4.4)$$
    $$\bar{\sigma}_{p0}^{max} = \sigma_{p0}^{max} - 0.65(\Delta\sigma_\phi + \Delta\sigma_{rf}) \qquad (4.5)$$
- pentru armăturile postîntinse :
  - în faza iniţială
    $$\sigma_{pp}^{min} = \sigma_{pk} - (\Delta\sigma_\lambda + \Delta\sigma_f + \Delta\sigma_s + \Delta\sigma_{str}) \qquad (4.6)$$
    $$\sigma_{pp}^{max} = \sigma_{pk} - 0{,}65(\Delta\sigma_\lambda + \Delta\sigma_f + \Delta\sigma_s + \Delta\sigma_{str}) \qquad (4.7)$$
    $$\sigma_{p0} = \sigma_{pp} + n_p\sigma_{bp}$$
  - în faza finală
    $$\bar{\sigma}_{p0}^{min} = \sigma_{p0}^{min} - (\Delta\sigma_\phi + \Delta\sigma_r) \qquad (4.8)$$
    $$\bar{\sigma}_{p0}^{max} = \sigma_{p0}^{max} - 0.65(\Delta\sigma_\phi + \Delta\sigma_r) \qquad (4.9)$$

4.3 Ara,turi preîntinse

A. În faza iniţială

4.3.1 Pierderi de tensiune la ancoraj ($\Delta\sigma_\lambda$)

Aceste pierderi corespund lunecării toroanelor sau sârmelor în pene şi a penelor în plăcile de ancoraj la detensionarea presei şi blocarea penelor. Tendinţa de recul a armăturii blochează prin efect de pană penele în ancoraj. Această lunecare are valori de la 1 la 12 mm în funcţie de tipul de ancoraj şi proecedeul de pretensionare folosit. El figurează în fişa de agrement tehnic a procedeului, sau în STAS 10107/0-90.

Scurtarea armăturii este :

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{L_p} \qquad (4.10)$$

unde : λ = lunecarea în ancoraj ;
L_p = lungimea cablului între ancoraje.

Această scurtare produce o pierdere de tensiune în armătură :

$$\Delta\sigma_\lambda = \varepsilon E_p = \frac{\lambda E_p}{L_p} \qquad (4.11)$$

Dacă întinderea se face de la amblele capete, pierderea de tensiune este :

$$\Delta\sigma_\lambda = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)E_p}{L_p} \qquad (4.12)$$

Exemplu : Pentru un cablu de lungime L_p = 20 m, întins de la un singur capăt, la care lunecarea este λ = 5 mm, pierderea de tensiune este :

$$\Delta\sigma_\lambda = \frac{\lambda E_p}{L_p} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^3}{20} = 50MPa$$

Pentru un efort de control σ_{pk} = 1500 Mpa, acesta pierdere reprezintă 3,3 %

Conform standardului STAS 10107/0-90, anexa H, tabelul 44, lunecările în ancorajele cele mai utilizate în Români sunt :

Tabelul 4.1 – Valori ale lunecărilor în ancoraj după STAS 10107/0-90

Tipe de ancoraj		λ (mm)
Ancoraj cu piuliță pentru bare		1
Ancoraj cu pene pentru SBP A I ou TBP		4
Ancoraj cu pene pentru bare		4
Ancoraj inel-con simplu pentru fascicule cu sârme paralele	12Φ5 mm	4
	12Φ7 mm, 24Φ7 mm	5
Ancoraj inel-con dublu pentru fascicule 48Φ7 mm		7

4.3.2 Pierderi de tensiune din frecare pe traseu ($\Delta\sigma_f$)

La armăturile preîntinse, pierderile din frecare pe traseu apar numai în cazul armăturilor deflectate (ceea ce este destul de rar în cazul precomprimării cu armături preîntinse). Aceste pierderi trebuie determinate experimental.

4.3.3 Pierderi de tensiune datorită tensionării sucesive a armăturilor ($\Delta\sigma_s$)

Dacă pretensionarea se face pe stand, nu se produc pierderi, pentru că ancorarea se face pe culei, care sunt foarte rigide. Dacă pretensionarea se face pe tipar autoportant, la

fiecare tensionare a unui cablu tiparul se scurtează elastic, care produce o scădere a tensiunii în cablurile deja întinse.

Efortul unitar în tipar, după întinderea tuturor cablurilor, este :

$$\sigma_T = \frac{Forta \cdot totala \cdot de \cdot precomprimare}{Aria \cdot \sec tiunii \cdot tiparului} \tag{4.13}$$

Ceea ce revine, pentru fiecare cablu întins, la o variație $\frac{\sigma_T}{n}$ a efortului unitar şi respectiv $\Delta\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{nE_T}$ a deformației.

Dar $\Delta\varepsilon_T = \Delta\varepsilon_p$ şi efortul unitar în cablu scade cu $\Delta\sigma = E_p\Delta\varepsilon_p = \frac{E_p}{E_T}\frac{\sigma_T}{n} = n_T\frac{\sigma_T}{n}$

Deci :

Cablul *1* : $\Delta\sigma = \frac{n-1}{n} n_T\sigma_T$

....

Cablul *i* : $\Delta\sigma = \frac{n-i}{n} n_T\sigma_T$

....

Cablul *n* : $\Delta\sigma = 0$

Dacă cablurile sunt concentrate pe o zonă restrânsă din secțiunea elementului, normele permit să se calculeze şi să se utilizeze o valoare medie :

$$\Delta\sigma_s = \frac{n-1}{2n} n_T\sigma_T \tag{4.14}$$

4.3.4 Pierderi datorită tratamentului termic ($\Delta\sigma_t$)

Tratamentul termic la care sunt supuse elementele de beton precomprimat pentru a accelera întărirea betonului este la originea unor pierderi de tensiune legate de dilatarea termică şi apoi contracția la răcire a betonului şi a armăturii. După normele româneşti (STAS 10107/0-90), aceste pierderi pot fi evaluate în felul următor :

- Când se utilizează stenduri de precomprimare : $\Delta\sigma_t = 1{,}25\Delta t$ *(4.15)*
  (unde Δt = diferența de temperatură)
  pentru stenduri lungi (circa 100 m) $\Delta\sigma_t \cong 80\ MPa$ *(4.16)*

- Când se utilizează tipare autoportante încălzitoare :

$$\Delta\sigma_t \cong 20\ MPa \tag{4.17}$$

4.3.5 Pierderea de tensiune datorită relăxarii armăturilor în faza inițială ($\Delta\sigma_{ri}$)

Relaxarea de oțelului este o scădere a efortului unitar sub deformație constantă. Ea apare la oțelurile cu limită de elasticitate ridicată utilizate la beton precomprimat numai pentru eforturi unitare mai mari decât 30 sau 40% din efortul unitar de rupere. Mărimea relaxării depinde de natura oțelului, de tratamentele la care este supus în procesul de fabricare şi de nivelul de efort unitar.

Se disting armături cu *relaxare normală* şi armături cu *relaxare scăzută* (de exemplu, pentru sârmele sau toroanele cu relaxare normală, supuse la un efort unitar inițial de $0,7\sigma_r$, relaxarea la 1000 de ore este 8% din efortul inițial ; pentru armăturile cu relaxare scăzută, aceasta este 2,5% din efortul inițial). Ținând cont de diferența mică de preț între cele două două tipuri de armături, economia realizată datorită folosirii armăturilor cu relaxare scăzută face preferabilă folosirea acestora.

În normele normes de produs (STAS 6482/2,3,4 din 1980) sunt date valorile relaxării pure la 1000 de ore. Relaxarea finală este considerată :

$\Delta\sigma_{r\infty} = 2\Delta\sigma_{r\,1000}$ pentru SBP, SBPA şi TBP

$\Delta\sigma_{r\infty} = \Delta\sigma_{r\,1000}$ pentru PC 90

Relaxarea variază după o lege exponențială (figura 4.1) şi relaxarea la timpul *t* este :

$$\Delta\sigma_{rt} = K_{rt}\Delta\sigma_{r\infty} \qquad (4.18)$$

Vlaorile K_{rt} sunt date dîn le tabelul 4.2 (după STAS 10107/0-90 anexa H, tabelul 46) :

Tabelul 4.2 – Valorile coeficientului K_{rt} după STAS 10107/0-90

t	1 oră	24 h	100 h	120 h	42 zile	90 zile	1 an	14 luni	11 ani
K_{rt}	0,21	0,40	0,51	0,53	0,73	0,79	0,89	0,90	0,98

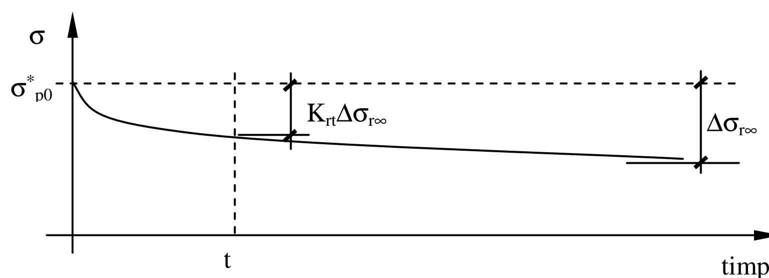


Figura 4.1 – Relaxarea armăturii în timp

Pierderea finală prin relaxare (fracțiunea din efortul inițial $\rho\%$) este dată în STAS 10107/0-90 în funcție de efortul unitar după pierderile instantanee şi tipul de oțel (vezi tabelul 4.3) :

$$\rho = \frac{\Delta\sigma_{r\infty}}{\sigma^*_{p0}}\% \qquad (4.19)$$

cu $\sigma^*_{p0} = \sigma_{pk} - \Delta\sigma_\lambda - \Delta\sigma_f - \Delta\sigma_s$ (4.20)

Tabelul 4.3 – Pirederea de tensiune din relaxarea armăturilor (% din efortul inițial)

Tipul oțelului	σ^*_{p0} / R_{pk}			
	0,50	0,60	0,70	0,80
	$\rho = \Delta\sigma_{r\infty} / \sigma^*_{p0}$ în %			
SBP, SBPA	0	4,5	9,0	14,0
TBP	0	5,0	10,5	16,5

Deci :

$$\Delta\sigma_{r\infty} = \rho \cdot \sigma^*_{p0} \tag{4.21}$$

şi pierderea din relaxare în faza inițială este :

$$\Delta\sigma_{ri} = K_{rt}\Delta\sigma_{r\infty} \tag{4.22}$$

cu K_{rt} care correspunde momentului la care are loc transferul.

B. În faza finală

4.3.6 Pierderea de tensiune datorită curgerii lente a betonului ($\Delta\sigma_\varphi$)

Sub acțiunea unei încărcări permanente, efortul unitar în beton este σ_{bp}, iar deformația instantanee este σ_{bp}/E_b. Deformația finală de curgere lentă este :

$$\varepsilon_{\overline{\varphi}} = \overline{\varphi}\frac{\sigma_{bp}}{E_b} \tag{4.23}$$

Pierderea de tensiune în armătură este :

$$\Delta\sigma_\varphi = \varepsilon_{\overline{\varphi}} E_p = \overline{\varphi}\frac{\sigma_{bp}}{E_b} E_p = n_p \overline{\varphi}\sigma_{bp}$$

În cazul general, când mai multe încărcări permanente intervin la momente diferite, pierderea de tensiune este :

$$\Delta\sigma_\varphi = n_p \sum_i \overline{\varphi}_i \sigma_{bp,i} \tag{4.24}$$

unde :

$\sigma_{bp,i}$ = efortul unitar în beton la nivelul armăturii pretensionate sub efectul încărcărilor permanente aplicate la momentul i ;

φ_i = coeficient de fluaj al betonului corespunzând momentului i ;

4.3.7 Pierderea de tensiune datorită relăxarii armăturilor în faza finală ($\Delta\sigma_{rf}$)

Relaxarea armăturii într-un element de beton precomprimat este mai mică decât relaxarea pură a oțelului, pentru că efortul în armătură scade *a)* sub efectul scurtării betonului datorită contracţie şi curgerii lente şi *b)* sub efectul tratamentului termic şi al scurtării elastice a betonului în momentul transferului.

Pierderea de tensiune datorită relaxării armăturii in faza finală este deci :

$$\Delta\sigma_{rf} = \eta_r(\Delta\sigma_{r\infty} - \Delta\sigma_{ri})\left(1 - \frac{\Delta\sigma_{\overline{\varphi}}}{\sigma_{p0}}\right) \tag{4.25}$$

unde :

$$\eta_r = \frac{(\sigma^*_{p0} - \Delta\sigma_t - n_p\sigma_{bp}) - 0,5R_{pk}}{\sigma^*_{p0} - 0,5R_{pk}} \tag{4.26}$$

4.4 Armături postîntinse

A. În faza inițială

4.4.1 Pierderi de tensiune datorită frecării pe traseu ($\Delta\sigma_f$)

Se admit următoarele ipoteze :

- coeficientul de frecare μ este considerat constant pe toată lungimea cablului ;
- valoarea coefcientului de frecare μ este independantă de valoarea presiunii u ;
- frecarea parazită pe zonele drepte este modelată printr-un unghi constant pe unitatea de lungime β (°/m).

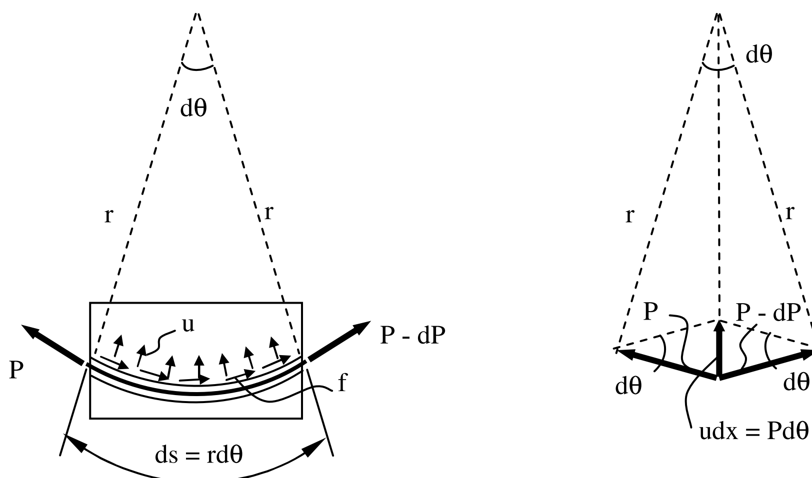


Figura 4.2 – Forțe care acționează pe un element de cablu curb

Considerăm un element de cablu, de lungime *ds* şi rază de curbură *r*, supus la un efort de întindere *P* (figura 4.2). Variaţia unghiului între extremităţile acestui element de cablu este $d\theta$. Avem :

$$ds = rd\theta.$$

Echilibrul forţelor dă :

– după direcţia tangentă la cablu

$$dP + fds = 0 \quad (4.27)$$

– după direcţia normală la cablu

$$uds = P \sin(d\theta/2) + (P-dP) \sin(d\theta/2)$$

sau

$$uds = Pd\theta \quad (4.28)$$

dacă considerăm $\sin(d\theta/2) \cong d\theta/2$ şi neglijăm produs cantităţilor foarte mici $dP\sin(d\theta/2)$.

Pe de altă parte, legea frecării dă :

$$f = \mu u \quad (4.29)$$

de unde :

$$fds = \mu uds = \mu Pd\theta$$

şi apoi :

$$dP + \mu Pd\theta = 0 \quad (4.30)$$

Integrând această ecuaţie diferenţială se obţine :

$$P(\theta) = Ce^{-\mu\theta} \quad (4.31)$$

Şi punând condiţiile la limită, adică :

$$\theta = 0,\ P(0) = P_k$$

rezultă constanta de integrare $C = P_k$ şi, în consecinţă :

$$P(\theta) = P_k\, e^{-\mu\theta} \quad (4.32)$$

Frecarea parazită pe liniile drepte dă, pe o lungime *x* un unghi echivalent βx, şi formula precedentă devine :

$$P(\theta) = P_k\, e^{-\mu\theta + \mu\beta x} \qquad (4.33)$$

Notând $k = \mu\beta$ şi $\theta_i = \frac{L_i}{r_i}$ pentru arcul s_i, se scrie relaţia generală, pentru o secţiune situată la distanţă x de origine :

$$\mathrm{P_s} = P_k e^{-(\mu\sum\frac{L_i}{r_i}+kx)} \qquad (4.34)$$

Si pierderea de tensiune este :

$$\Delta\mathrm{P_f} = P_k(1-e^{-(\mu\sum\frac{L_i}{r_i}+kx)}) \qquad (4.35)$$

sau, exprimat în eforturi unitare (împărţind cu A_p) :

$$\Delta\sigma_f = \sigma_k(1-e^{-(\mu\sum\frac{L_i}{r_i}+ks)}) \qquad (4.36)$$

Pentru a simplifica calculul, unele norme admit să se dezvolte expresia $1\text{-}e^{-A}$ în serie şi să se reţină numai primul termen, dacă A este mic :

$$1-e^{-(\mu\sum\frac{L_i}{r_i}+ks)} \cong \mu\sum\frac{L_i}{r_i}+ks \qquad (4.37)$$

Valorile lui μ şi k sunt date în Agrementul Technic corespunzător. Valoarea lui μ depinde de caracteristicile de suprafaţă ale armăturilor şi ale tecii, de prezenţa sau nu a ruginii, de alungirea armăturii şi de traseul său.

În lipsa datelor din Agrementul Tehnic, se pot folosi coeficienţii μ şi k daţi în STAS 10107/0-90 (Tabelul 4.4) sau EN 1992-1 (Tabelul 4.5).

Tabelul 4.4 – Coeficienţi ***μ*** *şi* ***k*** *pentru cabluri formate cu sârme sau toroane paralele*

Modul de realizare al canalului	**μ**	**P_k (kN)**		
		< 650	**650÷1300**	**> 1300**
		k/mètre		
Teacă din tablă	0,35	0,006	0,004	0,003
Teacă din PVC	0,30	0,004	0,002	0,0015
Canal de beton (teaca este extrasă înainte de întărirea betonului)	0,45	0,004	0,002	0,0015

Tabelul 4.4 – Coeficienţis de frecare ***μ*** *pentru armături postîntinse interioare şi armături exterioare neaderente*

	Armături interioare[1)]	Armături exterioare (neaderente)			
		Teacă din oţel / neunsă	Teacă din PEHD / neunsă	Teacă din oţel / unsă	Teacă din PEHD / neunsă
Sârmă trefilată la rece	0.17	0.25	0.14	0.18	0.12
Toron	0.19	0.24	0.12	0.16	0.10
Bară nervurată	0.65	-	-	-	-
Bară lisă	0.33	-	-	-	-
[1)] în cazul armăturilor care umplu circa jumătate din teacă					

Variația efortului unitar într-un cablu cu părți curbe şi drepte este reprezentată în figure 4.3 :

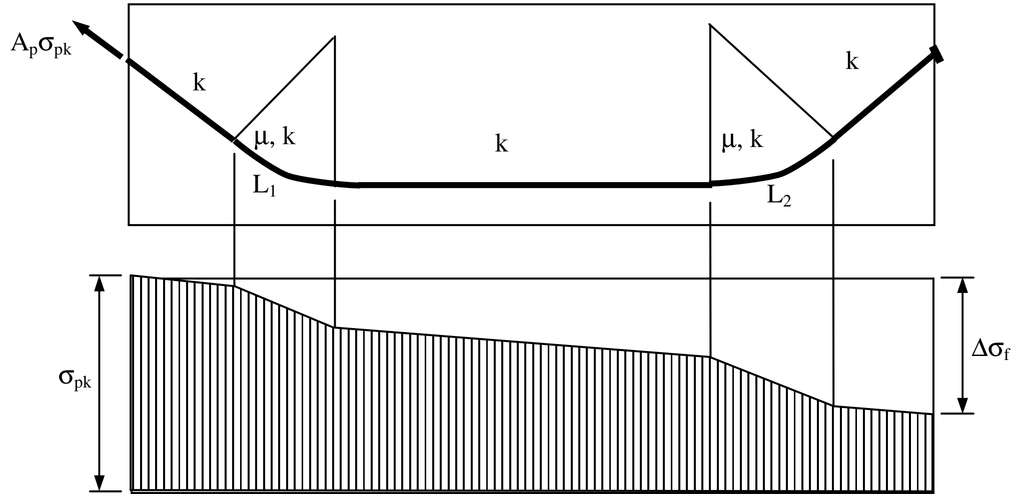


Figura 4.3 - Variația efortului unitar în cablu de-a lungul elementului

4.4.2 Pierderi de tensiune datorită lunecării in ancoraj ($\Delta\sigma_\lambda$)

Aceste pierderi corespund lunecării toroanelor sau sârmelor față de pene la detensionarea presei şi blocarea penelor (vezi § 4.3.1).

Această mişcare, care are loc în sens invers celui dat de punerea în tensiune, provoacă o frecare de sns opus celei precedente. În diagrama efort-distanță (figura 4.4), curba care reprezintă efortul are pantă opusă celei care reprezintă frecarea. Panta acestei curbe, în valoare absolută, reprezintă pierderea de tensiune pe unitatea de lungime.

Frecarea la recul este considerată, după STAS 10107/0, mai mare (cu 30%) frecării la punerea în tensiune :

$$\mu' = 1,3\mu \qquad (4.38a)$$
$$k' = 1,3k \qquad (4.38b)$$

Lunecarea în ancoraj (λ în metri) se repercutază până la diatanța x_C , iar efortul unitar în acest punct este $\sigma_{p,C}$.

Un element de cablu de lungime dx este supus unei scurtări datorită lui $\Delta\sigma_\lambda$ egală cu $dx\Delta\sigma_\lambda/E_p$. Or, lunecarea λ reprezintă integrala acestor scurtări, adică :

$$\lambda = \int_A^C \frac{\Delta\sigma_\lambda}{E_p} dx \qquad (4.39)$$

De unde $$\lambda E_p = \int_A^C \Delta\sigma_\lambda dx \qquad (4.40)$$

Se poate aproxima aria triunghiului curb (nehaşurat pe figură) cu aria unui triunghi cu laturi drepte având aceeaşi bază şi aceaşi înălțime :

$$\int_A^C \Delta\sigma_\lambda dx \cong \frac{\Delta\sigma_\lambda^{max} \cdot x_C}{2} \quad (4.41)$$

Se obține o ecuație unde singurele necunoscute sunt x_C şi $\Delta\sigma_\lambda^{max}$:

$$\frac{\Delta\sigma_\lambda^{max} \cdot x_C}{2} = \lambda E_p \quad (4.42)$$

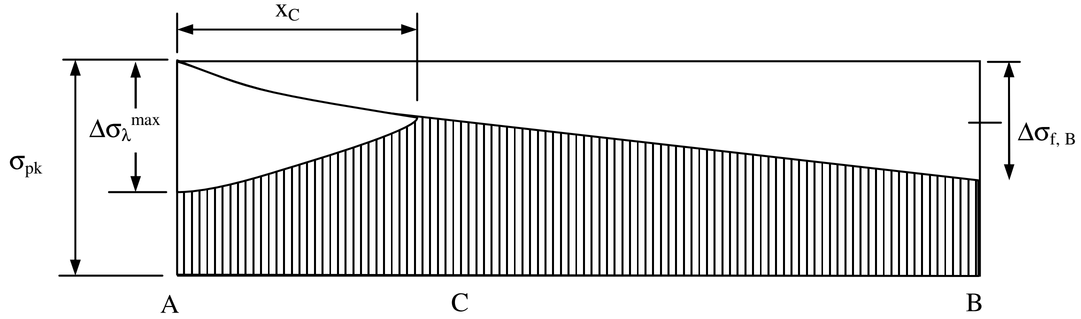


Figure 4.5 – Représentation de la contrainte après frottement et glissement

Efortul unitar în punctul *C*, ținând cont numai de frecarea la punerea în tensiune este (vezi § 4.4.1) :

$$\sigma_{p,C} = \sigma_{pk} e^{-(\mu \sum \frac{L_i}{r_i} + ks)} \quad (4.43)$$

Efortul unitar în punctul *A'*, ținând cont de frecarea de recul este :

$$\sigma_{p,A} = \sigma_{p,C} e^{-(\mu' \sum_A^C \frac{L_i}{r_i} + k' x_C)} = \sigma_{pk} e^{-[(\mu'+\mu)\sum_A^C \frac{L_i}{r_i} + (k'+k) x_C]} = \sigma_{pk} e^{-2,3(\mu \sum_A^C \frac{L_i}{r_i} + k x_C)} \quad (4.44)$$

Pierderea de tensiune în secțiunea *A este :*

$$\Delta\sigma_\lambda^{max} = \sigma_{pk} \left[1 - e^{-2,3(\mu \sum_A^C \frac{L_i}{r_i} + k x_C)} \right] \quad (4.45)$$

Ecuația (4.45) este a doua ecuație cu necunoscute x_C şi $\Delta\sigma_\lambda^{max}$, ceea ce permite să se determine distanța până la care este resimțit efectul reculului şi pierderea de tensiune datorată lunecării în ancoraj (ecuațiile 4.42 şi 4.45).

Observații privind pierderilor de tensiune din frecare pe traseu şi lunecare în ancoraj

Dacă elementul de beton precomrimat este lung şi întinderea se face la o singură extremitate, pierderea din frecare este importantă (figurile 4.3 şi 4.4). Pentru a reduce aceste pierderi, trebuie întins cablul de la ambele extremități (figura 4.5).

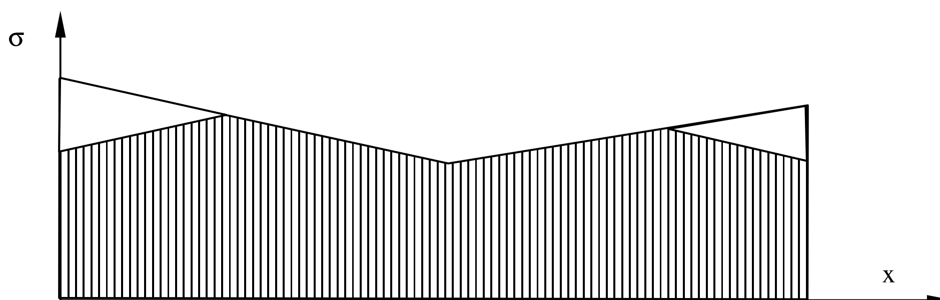


Figura 4.5 – Reprezentarea eforturilor unitare de-a lungul armăturii dacă întinderea se face de la ambele extremități

4.4.3 Pierderi de tensiune datorită întinderii sucesive a armăturilor ($\Delta\sigma_s$)

Presupunem că un element de beton precomprimat este realizat cu mai multe cabluri pretensionate. Întinderea cablurilor neputându-se efectua decât cablu cu cablu, întinderea celui de-al doilea cablu va antrena o scurtare a elementului şi a primului cablu ; similar, întinderea celui de-al treilea cablu va antrena o scurtare a elementului şi a primelor două cabluri, şi aşa mai departe.

Deci, dacă sunt *n* cabluri, întinderea cablului $j > i$ produce un efort unitar $\sigma_{bp,ij}$ la nivelul cablului *i* şi o scurtare a elementului şi a cablului *i* egală cu $\Delta\varepsilon_{ij} = \sigma_{bp,ij}/E_b$, şi în consecință o pierdere de tensiune în cablul *i* :

$$\Delta\sigma_{s,ij} = \Delta\varepsilon_{ij}E_p = \sigma_{bp,ij}(Ep/E_b) = n_p\sigma_{bp,ij} \qquad (4.46)$$

Sub efectul întinderii tuturor cablurilor *j*, cu $i < j \le n$, pierderea de tensiune în cablul *i* este :

$$\Delta\sigma_{s,i} = n_p \sum_{j>i}\sigma_{bp,ij} \qquad (4.47)$$

Dacă cablurile sunt întinse cu forțe identice, şi dacă aceste cabluri sunt grupate într-o zonă relativ mică în raport cu înălțimea secțiunii, STAS 10107/0-90 admite utilizarea unei valori medii a pierderii de tensiune :

$$\Delta\sigma_s = \frac{n-1}{2n}n_p\sigma_{bp} \qquad (4.48)$$

unde σ_{bp} este efortul unitar în beton la nivelul rezultantei forțelor din cabluri, sub acțiunea forței totale de precomprimare.

B. În fază finală

4.4.4 Pierderea de tensiune datorită curgerii lenti a betonului ($\Delta\sigma_\varphi$)

Vezi § 4.3.6. Reaminitim formula de calcul a pierderii de tensiune datorită curgerii lente :

$$\Delta\sigma_{\varphi} = n_p \sum_i \overline{\varphi}_i \sigma_{bp,i} \tag{4.49}$$

4.4.5 Pierderea de tensiune datorită relaxării armăturii ($\Delta\sigma_r$)

Calculul relaxării pure se face cum a fost arătat la paragraful § 4.3.5 :

$$\Delta\sigma_{r\infty} = \rho \cdot \sigma^*_{p0} \tag{4.50}$$

Cu singura diferență că :

$$\sigma^*_{p0} = \sigma_{pp} \tag{4.51}$$

Evident, nu există relaxare în faza inițială, ca în cazul preîntinderii. Expresia pierderii de tensiune din relaxare este atunci, ținând seama de efectul scurtării datorate curgerii lente a betonului :

$$\Delta\sigma_r = \Delta\sigma_{r\infty}\left(1 - \frac{\Delta\sigma_{\overline{\varphi}}}{\sigma_{p0}}\right) \tag{4.52}$$

4.5 Limitarea eforturilor unitare în armăturile pretensionate în faza finală

Efoprturile unitare în cablurile pretensionate trebuie să verifice, în faza finală şi sub efectul încărcărilor de exploatare, relațiile următoare :

- armături din SBP şi TBP :

$$0{,}5R_p \leq \overline{\sigma}_p \leq 0{,}85R_p \tag{4.53}$$

- armături din PC 90 :

$$0{,}55R_p \leq \overline{\sigma}_p \leq 1{,}0R_p \tag{4.54}$$

unde :

$$\overline{\sigma}_p = \overline{\sigma}_{p0} + \Delta\sigma_p \tag{4.55}$$

Trebuie de asemenea limitată creşterea de eforturi în exploatare :

- preîntindere :

$$\Delta\sigma_p \leq \Delta\sigma_\varphi + (\ \Delta\sigma_r - \Delta\sigma_{ri}\ ) \tag{4.56}$$

- postîntindere :

$$\Delta\sigma_p \leq \Delta\sigma_\varphi + \Delta\sigma_r \tag{4.57}$$